

弾塑性論と吸水軟化試験による砂質土の強度定数に関する考察

名城大学 正会員 ○小高猛司・崔 瑛
建設技術研究所 正会員 李 圭太

1. はじめに

砂や砂礫の河川堤防のすべり安定性を照査する場合に用いる強度定数は、CUB 試験か CD 試験で求めることが推奨されている。しかし、砂質系の河川堤防土においては、比較的密詰めの場合も多く、完全に水を排水させないように行う CUB 試験を実施した場合、正のダイレイタンスの拘束圧によって軸差応力が増加をし続ける傾向があり、場合によってはそれが強度定数の過大評価に繋がる可能性もある。本報では、通常行っている CUB 試験で得られる結果が、強度定数を決定する場合にどのような意味があるのか、弾塑性力学の側面から考察するとともに、堤防の浸透条件を模擬した吸水軟化試験を実施し、低拘束圧条件における強度定数の位置づけについても考察した。

2. 弾塑性論に基づく強度定数の合理的解釈

オリジナルカムクレイモデルを代表する限界状態土質力学に基づけば、限界状態線（以下 CSL）は図 1(a)に示すように、塑性膨張と塑性圧縮の境界線となり、負荷規準を考察することによって、軟化と硬化の境界にもなる。ただし、図 1(b)の青線で示すような典型的な密詰め砂であったり、図 1(c)の赤線で示すような典型的なゆる詰め砂であったりした場合、前者であれば「塑性膨張を伴う硬化」、後者であれば「塑性圧縮を伴う軟化」という図 1(a)のオリジナルカムクレイモデルの範疇の弾塑性論では説明できない。そのため、橋口による下負荷面モデルをカムクレイモデルに組み込むことによって、硬化と軟化の境界を CSL より上側で規定することが可能となり、「塑性膨張を伴う硬化」という密な砂の力学挙動が説明できるようになった。一方、「土の骨格構造（以下、単に構造と呼ぶ）」の度合いに応じて、硬化・軟化の境界を CSL の下側に決めることにより、「塑性圧縮を伴う軟化」を説明できるようにしたものが、浅岡らによる上負荷面カムクレイモデルである。実際の土は自然の状態において、「過圧密」も「構造」も有しており、そのいずれの度合いが卓越し、かつそれらの影響度合がせん断中に徐々に変わる。両者を組み込んだモデルが SYS カムクレイモデルである。

ここでは、個別のモデルの詳細な説明は割愛し、弾塑性論の立場から土質定数の考察を行う。図 1 (b)の青線の典型的な密詰め砂の非排水せん断挙動を考える場合、CUB 試験で得られる内部摩擦角 ϕ' は、CSL の上側に新たに作った軟化・硬化の境界線の傾きに相当する。土固有の状態量である CSL は、前節で提案した変相線に相当し、その線の傾き ϕ_p は、CSL の傾き M に相当する。一方、ゆる詰め砂の典型的な非排水せん断挙動である図 1(c)の赤線を考える場合、CUB 試験で得られる内部摩擦角 ϕ' は、CSL の下側に新たに作った軟化・硬化の境界線の傾きに相当する。ゆる詰め砂の場合には、変相線の傾き ϕ_p と通常の内摩擦角 ϕ' は一致すると考える。結果として、CUB 試験で得られる強度定数の位置づけを明確にすると、砂の状態を問わず、内部摩擦角 ϕ' は軟化領域と硬化領域の境界である。

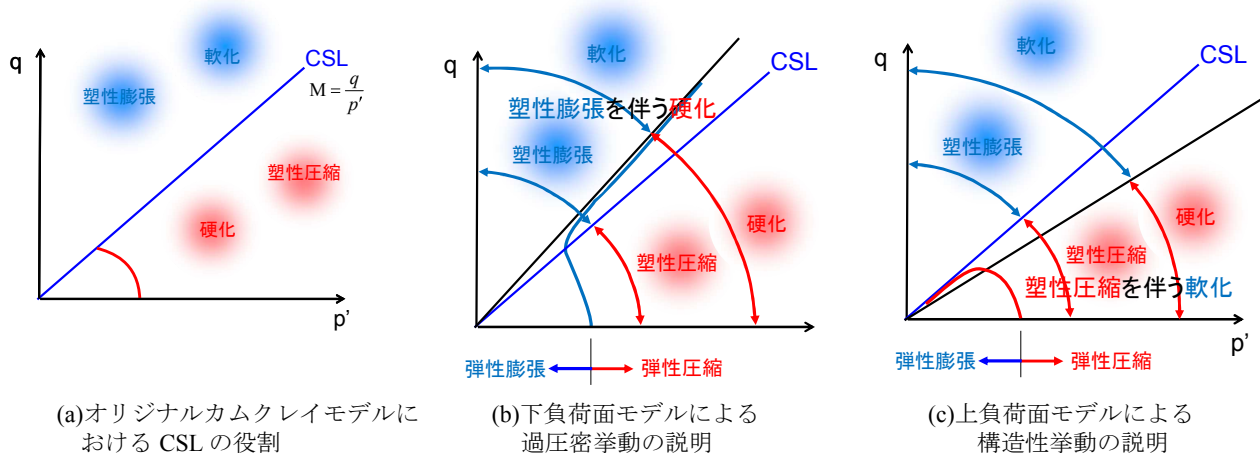


図 1 弾塑性モデルに基づく土のせん断挙動の解釈

3. 吸水軟化試験による強度定数の位置づけの解釈

図2は前節の解釈を明確にするために実施した、有効応力経路を制御した排水（吸水）せん断試験結果である。比較のために通常の CUB 試験も実施している。実験試料は、小鴨川堤防で採取した礫混じり砂であり、密詰め（締固め度 90%）とゆる詰め砂（締固め度 80%）の 2 種類である。(b)の有効応力経路には、CUB 試験による経路を、密詰め砂が青線、ゆる詰め砂がピンクで示している。通常の実務と同様に、この二つの CUB 試験結果から、密詰め、ゆる詰めそれぞれの ϕ' 、 ϕ_p を決め、それぞれの傾きが低い有効応力レベルにおいて、どのような位置づけにあるのか、吸水試験によって明らかにする。(c)の有効応力経路は、(b)を拡大したものである。黒線が密詰め砂の吸水試験結果であり、重なって見えづらいが、赤線がゆる詰め砂の吸水試験結果である。さらに、ゆる詰め砂の結果のみにした図が(d)の有効応力経路である。

(c)の有効応力経路に着目する。通常の CUB 試験と同様に、初期有効応力 100kPa で等方圧密した後、排水条件で徐々に軸差応力を増加させ、 $q=50\text{kPa}$ まで上昇させる。ここまでは、通常の CD 試験とほぼ同じである。 $q=50\text{kPa}$ 到達後は、そのまま q 一定のまま、供試体内への吸排水を許したまま、間隙水圧を徐々に上昇させることにより平均有効応力 p' を低下させ、破壊するまでその操作を継続する。これは、堤防の浸潤に伴う不安定化を模擬したものであり、低い有効応力状態での破壊を観察するための実験である。(c)図より、密詰め砂の黒線は、試験で得られた ϕ_p を超え、さらに ϕ' を超えて軟化領域に入り、しばらくしてから急激に吸水が始まり、軸ひずみが急激に増加し破壊に至る。(a)の軸差応力～軸ひずみ関係において、急激に吸水がはじまり破壊したと判断できる点を黒点で表しているが、その状態に至るまでほとんど軸ひずみが進行しておらず、いわば剛塑性的な破壊をしている。一方、(d)のゆる詰め砂も同様の実験をしているが、試験で得られた ϕ_p ならびに ϕ' を超えて軟化領域に入り、CUB 試験の有効応力経路と同じ位置に至ってから急激に吸水が始まり、軸ひずみが急激に増加し破壊に至る。

以上のように、CUB 試験で決定した ϕ_p ならびに ϕ' は、有効応力の空間上で、排水条件や応力レベルに関係なく、破壊領域を特定するための境界線として用いることができる。具体的には ϕ' よりも左側に有効応力状態が入ると危険である。ただし、密詰め砂の ϕ' は、試料の状態によって容易に変わりうるものであることから、土の固有の性質を表す CSL に相当する ϕ_p を用いる方が、安全側でもあり、適切であると考えている。また、堤防は低拘束圧での破壊現象であるため、通常の高い拘束圧での三軸試験は不適切であるとの批判もよく聞かれるが、この試験からわかるように、三軸試験で決定しているのは応力レベルの小さい領域でも成り立つ破壊の敷居線であり、低拘束圧で無理に求める必要もなく、実験誤差の少ない通常の三軸試験でも問題はない。

4. まとめ

すべり破壊に用いる強度定数は、CUB 試験を実施した上で、 ϕ_p ならびに ϕ' を求め、基本的には ϕ_p を採用する。なお、 ϕ_p ならびに ϕ' の決定にあたっては、粘着力 c はゼロとして求めることが妥当と考えている。 $c=0$ することにより、表層すべりモードが頻出してしまうことが考えられるが、これは実際に破壊に至るモードであるのか判断し、表層滑りモードは採用しないように配慮することによって、その問題は回避できるものと考えている。

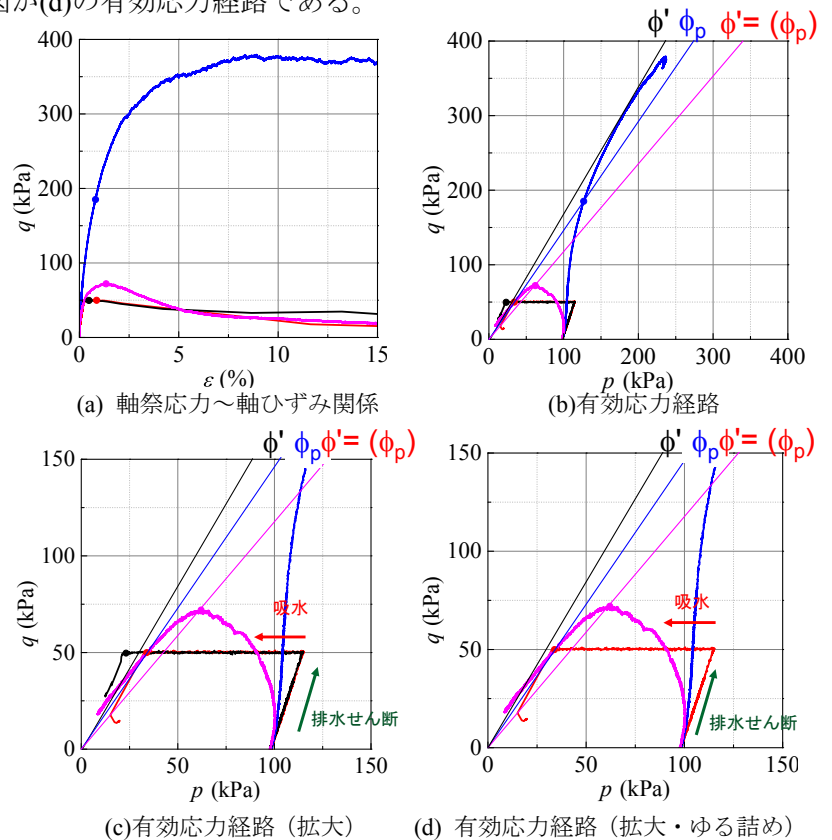


図2 吸水軟化試験による強度定数の位置づけ